

文章编号: 0253-2239(2007)11-1967-6

# 基于叠栅技术的二维亚波长周期结构成像设计\*

张成义<sup>1,2</sup> 陶纯堪<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 南京信息工程大学 物理系, 南京 210044)  
(<sup>2</sup> 南京理工大学 电光学院, 南京 210094)

**摘要:** 用光子学方法研究了叠栅技术中, 当试件光栅被拉压和旋转后, 叠栅条纹的空间周期和相对于基准光栅的取向, 试件光栅被拉压后的节距等相关问题。根据衍射光波的空间周期可能大于试件光栅空间周期的特点, 对二维亚波长周期结构衍射成像进行了设计研究。首先, 对二维亚波长周期结构衍射物进行编码, 以获得包含编码光栅空间信息的均匀波; 其次, 使编码得到的均匀波通过光学系统, 并被放大到 CCD 相机所能辨识的大小; 再次, 经解码光栅解码, 滤掉编码波, 最终获得二维亚波长周期结构物的空间结构信息, 达到超分辨的目的。同时, 对成像过程进行了较为详尽的分析, 对编码器、解码器的位置以及它们相对衍射物的取向进行了设计研究, 对滤波器的选择给予了必要的说明, 指出了取得超分辨成像的关键。

**关键词:** 信息光学; 亚波长成像; 叠栅效应; 光子学方法; 编码和解码

中图分类号: TN911.74; O438.2 文献标识码: A

## An Imaging Approach of Two-Dimensional Object with Subwavelength Periodic Structure Based on Moiré Technique

Zhang Chengyi<sup>1,2</sup> Tao Chunkan<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Department of Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044)  
(<sup>2</sup> School of Electronic Engineering and Optoelectronic Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094)

**Abstract:** When the measuring grating is pulled and/or rotated relative to the reference grating, both of the spatial period and the direction of moiré fringes are studied by photonics method in moiré technique, so does the stop of measuring grating. An approach of imaging of two-dimensional object with subwavelength periodic structure is given based on the fact that spatial period of diffractive wave may be larger than measuring grating's one in moiré technique. First, two-dimensional object with subwavelength periodic structure can be encoded by a perpendicular grating so that homogeneous waves can be obtained. Second, passing through the optical system designed specially, the well-distributed waves with evanescent waves can be enlarged so that it can be recognized by CCD camera. Third, the homogeneous waves with evanescent waves can be decoded by a decoding grating. By decoding, the information of encoding grating is filtered, the image of two-dimensional object with subwavelength periodic structure can be reappeared in the image plane. By the approach given, superresolution image of two-dimensional object with subwavelength periodic structure will be obtained. Theoretical analysis and experimental design for the imaging process of two-dimensional object with subwavelength structure are given well by photonics method. At the same time, the directions of filters as well as the main factors of the imaging are discussed in the novel technique.

**Key words:** information optics; subwavelength imaging; moiré effect; photonics method; encoding and decoding

### 1 引言

通常情况下, 空间周期小于光波波长的周期结构物, 是不能用常规方法成像的, 因为经该物衍射形成的隐失波在传播过程中将迅速衰减<sup>[1~6]</sup>, 常将这种衍射物称为亚波长周期结构物。文献[1, 7]研究

了一维亚波长周期结构物衍射成像问题, 通过对一维亚波长周期结构物进行适当编码, 使经衍射形成的隐失波被均匀波所携带, 再经过恰当的解码, 滤掉编码波, 就会再现原一维亚波长周期性物的空间信息, 取得用传统光学仪器对一维亚波长周期结构的

\* 江苏技术与经济管理委员会 06JC043 立项资助课题。

作者简介: 张成义(1961—), 男, 黑龙江人, 教授, 博士, 主要从事信息光学及其成像技术方面的研究。

E-mail: dzcy1@163.com

收稿日期: 2007-02-09; 收到修改稿日期: 2007-05-14

成像,实现了超分辨。

注意到叠栅效应是周期结构所产生的一类光学现象,由于它在实验应力分析、精密测量、通信、成像等方面的广泛应用<sup>[8~12]</sup>,其理论与实践越来越引起人们的高度重视。从原理上讲,叠栅效应是经衍射形成的光波相互叠加的结果,揭示周期结构超分辨成像与叠栅效应的关系是非常重要的,况且周期结构超分辨成像已经成为当前关注的热点之一<sup>[13,14]</sup>。实际上,用编码光栅实现隐失波被均匀波携带,正是基于叠栅技术实现的,采用叠栅技术,可实现一般二维亚波长周期结构的超分辨成像。

本文运用光子学方法,对叠栅效应进行综合分

$$U(x, y, 0) = \iint A_0(f_x, f_y) \exp[j2\pi(xf_x + yf_y)] df_x df_y, \quad (1)$$

$$U(x, y, z) = \iint A_0 \exp\left[j2\pi\left(\frac{1}{\lambda^2} - f_x^2 - f_y^2\right)^{1/2} z\right] \exp[j2\pi(xf_x + yf_y)] df_x df_y, \quad (2)$$

两式的主要区别是传播因子  $\exp\left[j2\pi\left(\frac{1}{\lambda^2} - f_x^2 - f_y^2\right)^{1/2} z\right]$  的存在。

当用波长为  $\lambda$  的单色平行光垂直照射宏观光场分布为  $U(x, y, 0)$  的衍射物时,若入射光空间频率  $f=1/\lambda$  满足  $f^2 < f_x^2 + f_y^2$ , (2) 式表示的  $U(x, y, z)$  将随坐标  $z$  迅速减弱,成为隐失波<sup>[1~6]</sup>。由于衰减太快,该情况下,透射率函数为  $U(x, y, 0)$  的衍射物是不能成像的,对其成像即为超分辨成像。

## 2.2 超分辨成像常用方法

取得超分辨成像的常用方法主要有三种:第一是减小光波长,第二是增大成像仪器的数值孔径,第三是通过物信息的编码,降低通过成像仪器的空间频率。例如:扫描电子显微镜(SEM)利用缩短波长提高分辨极限,分辨极限可达原子级(0.1 nm)水平,但存在孔径角小(不到  $10^\circ$ )的缺点;可通过扩大透镜尺度,增大光传播所在媒质的折射率,来增大成像仪器的数值孔径,但其分辨极限也难于突破  $\lambda/2$ ,还会因光学系统庞大使造价大大提高;在不改变光学透镜几何尺寸的条件下,增大系统的综合孔径是效果明显的较好选择之一。WE. Lukosz 和 David Mendlovic 等<sup>[15~17]</sup>在 1967 年前后,较早提出了图 1 所示的第三种方法,主要是采用了两个反向移动的光栅,物面  $M_1$  上的周期物用虚线表示,两个反向移动的光栅用带箭头并冠以移动速度  $v$  的实线表示,其中“ $f_0$ ”表示透镜 Lens1 与 Lens2 等焦距,该方法可将光学系统的综合孔径扩大 5~6 倍。此后,采用旋转的达曼(Dammann)光栅并辅以反射镜对该实

析,在此基础上给出基于叠栅技术的二维亚波长周期结构物(以下简称二维物)超分辨成像的实验设计。

## 2 隐失波与超分辨成像简述

### 2.1 隐失波的产生

假定在  $z=0$  的空间平面  $(x, y, 0)$  上,存在一个分布函数为  $U(x, y, 0)$  的宏观光场,其  $x, y$  方向的空间频率用  $f_x, f_y$  表示,考虑由  $U(x, y, 0)$  在坐标  $z$  处的空间平面  $(x, y)$  上引起的光场分布  $U(x, y, z)$ ,据傅里叶光学的平面波展开法,  $U(x, y, 0)$  和  $U(x, y, z)$  可分别表示为<sup>[1,5]</sup>

验进行了多方面的改进,使操作更加灵活<sup>[18,19]</sup>。文献[1,4]采用光子学方法,研究了一维亚波长光栅超分辨成像,对成像仪器设置进行了深入分析,实际上各文献中采用的增大系统综合孔径的编、解码方法,正是基于叠栅技术实现的。

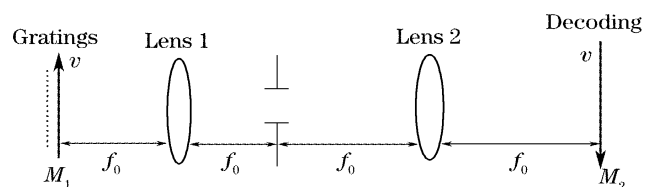


图 1 用两个移动光栅有效地增大光学系统的综合孔径  
Fig. 1 Achieving effectively larger aperture of optical system by two moving gratings

## 3 均匀线位移和纯转动并存时引起的叠栅效应的综合研究

下面用光子学方法,对叠栅效应进行一般性研究。

如图 2 所示,其中  $A, B, K$  是为了说明方便引入的栅线交点,  $C, D, E, F$  是从它们引出的投影点(垂足)。取光栅常量为  $d_1$  的基准光栅(Reference grating)栅线方向为参考方向  $e'_x$ , 取试件光栅(Measuring grating)被拉(压)后的光栅常量为  $d_2$ , 试件光栅相对于基准光栅旋转的角度为  $\alpha$ , 考虑单色平行光垂直光栅平面入射,若满足条件  $d_i (i=1,$

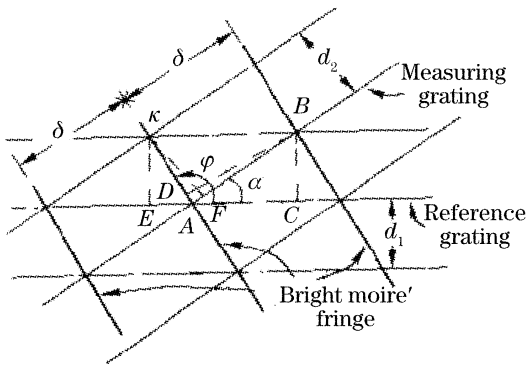


图 2 均匀线位移和纯转动并存时引起的叠栅效应  
Fig. 2 Moiré effect caused by the linear shift and the rotation only

2)  $\gg \lambda$  ( $d_1$  和  $d_2$  的含义见图 2), 各高级衍射波将与零级重叠, 按文献[1, 4]的观点, 分别取光子携带的基准光栅和试件光栅基频信息为

$$f_1 = \frac{1}{d_1} e_x, \quad f_2 = \frac{1}{d_2} e_2, \quad (3)$$

其中  $e_2$  表示试件光栅的频率取向, 用一级衍射位置和条纹间距标记叠栅条纹, 则有

$$f = f_1 + f_2 = \frac{1}{d_1} e_x + \frac{1}{d_2} e_2, \quad (4)$$

在试件光栅相对于基准光栅旋转  $\alpha$  角时,  $e_x$  和  $e_2$  间的夹角应取为  $\pi - \alpha$ , 于是

$$f_2 = - \left( \frac{1}{d_2} \cos \alpha e_x + \frac{1}{d_2} \sin \alpha e_y \right), \quad (5)$$

其中  $e_y$  表示与  $e_x$  垂直的取向, 将(5)式代入(4)式得到

$$f = \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \cos \alpha \right) e_x - \frac{1}{d_2} \sin \alpha e_y, \quad (6)$$

经基准光栅和试件光栅的共同作用后, 光子携带的空间频率  $f$  满足

$$f^2 = \frac{1}{\delta^2} = \left[ \left( \frac{1}{d_1} - \frac{1}{d_2} \cos \alpha \right) \right]^2 + \left( \frac{1}{d_2} \sin \alpha \right)^2, \quad (7)$$

空间周期为

$$\delta = \frac{d_1 d_2}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 - 2d_1 d_2 \cos \alpha}}, \quad (8)$$

图 2 中叠栅条纹 (Moiré fringe) 与参考光栅栅线的夹角  $\varphi$  也就是叠栅条纹法线与参考栅法线的夹角, 由(6)式可得,  $\varphi$  应满足

$$\tan \varphi = \frac{d_1 \sin \alpha}{d_1 \cos \alpha - d_2}, \quad (9)$$

但  $f_2 = f - f_1$ , 试件光栅被拉(压)后的节距  $d_2$  可据此求得。注意到  $f$  与  $-f_1$  之间夹角为  $\pi - \varphi$ , 得

$$\left( \frac{1}{d_2} \right)^2 = \left( \frac{1}{d_1} \right)^2 + \left( \frac{1}{\delta} \right)^2 + 2 \frac{1}{d_1 \delta} \cos \varphi, \quad (10)$$

整理上式, 得

$$d_2 = \frac{\delta}{\sqrt{1 + (\delta/d_1)^2 + 2(\delta/d_1) \cos \varphi}}. \quad (11)$$

(8)式、(9)式、(11)式分别给出了当试件光栅被拉压、旋转后, 叠栅条纹的空间周期; 条纹相对于基准光栅的取向; 试件光栅被拉、压后的节距等信息, 这些结果与常见文献是相同的<sup>[6, 20]</sup>, 且已被实验验证是正确的。

## 4 用叠栅技术编码形成均匀波

设图 2 的参考光栅为待分辨的一维亚波长周期结构物, 试件光栅为编码光栅, 且  $d_2 > d_1$ , 由(8)式可得

$$\Delta = \delta - d_2 =$$

$$\left[ \frac{1}{\sqrt{1 + (d_2/d_1)^2 - 2(d_2/d_1) \cos \alpha}} - 1 \right] d_2,$$

使  $\Delta > 0$  的条件是

$$1 > \cos \alpha > d_2/2d_1, \quad (12)$$

这同文献[1]由空间频率的考虑给出的结论相同。说明叠栅效应实际上提供了一种超分辨成像的技术途径, 只要使编码光栅与物光栅之间的夹角满足(12)式且空间周期满足  $d_2 > d_1$ , 经编码作用, 就可使一维亚波长周期结构物形成的隐失波被周期为  $\delta$  的均匀波所携带。(8)式表明经编码获得的合成信息空间周期变大, 频率变小, 这就是编码获得均匀波的本质所在, 可见, 这里的编码形成均匀波是基于叠栅技术实现的, 这为实现二维物的超分辨成像提供了依据。

## 5 二维亚波长周期结构成像研究

### 5.1 编码光栅设计

假设某二维亚波长周期结构的空间频率分别为  $f_2$  和  $f_3$ , 类似于图 3 所示的编码过程, 可对二维亚

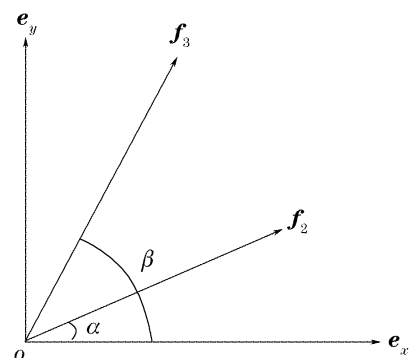


图 3 附在编码光栅上的二维周期结构物  
Fig. 3 Two-dimensional object with periodic structure attached to encoding grating

波长周期结构进行编码,选择编码器为空间频率是  $f_1$  的二维正交光栅,即

$$f_1 = f_{1x}e_x + f_{1y}e_y = \frac{1}{d_x}e_x + \frac{1}{d_y}e_y, \quad (13)$$

图中  $\alpha$  和  $\beta$  分别是  $f_2$  和  $f_3$  与  $e_x$  之间的夹角,  $d_x$  和  $d_y$  分别表示编码器沿着  $e_x$  和  $e_y$  方向的空间周期。

### 5.2 编码过程

类似于(5)式,可将二维物的空间频率表达为

$$\begin{cases} f_2 = -(f_2 \cos \alpha e_x + f_2 \sin \alpha e_y), \\ f_3 = -(f_3 \cos \beta e_x + f_3 \sin \beta e_y), \end{cases} \quad (14)$$

这里的  $f_i = 1/d_i, i = 2, 3$  分别表示图 3 所示的二维物的空间频率大小,当  $\beta - \alpha = \pm \pi/2$  时,该二维物为正交光栅,否则为一般二维物。

编码过程实际上是对二维物各空间分量进行编码,只有在每一分量都能传播的情况下,二维物才能实现超分辨,于是要求

$$\begin{cases} (f_i + f_{1x}e_x)^2 < 1/\lambda^2, \\ (f_i + f_{1y}e_y)^2 < 1/\lambda^2, \end{cases} \quad i = 2, 3 \quad (15)$$

例如,(15) 式中取  $i = 2$  并考虑第一式,得

$$\frac{1}{d_2^2} + \frac{1}{d_x^2} \pm \frac{2 \cos \alpha}{d_2 d_x} < \frac{1}{\lambda^2},$$

由于取正号代表的高频超出了透镜的截止频率,略去。整理上式,得到

$$\frac{1}{d_x} \left( \frac{1}{d_x} - \frac{2 \cos \alpha}{d_2} \right) < \left( \frac{1}{\lambda^2} - \frac{1}{d_2^2} \right), \quad (16)$$

根据二维物的空间周期  $d_2 < \lambda$ , 可解得

$$1 > \cos \alpha > d_2 / (2d_x), \quad (17)$$

类似可得其它各式分别为

$$\begin{cases} 1 > \cos \beta > d_3 / (2d_x), \\ 1 > \sin \alpha > d_2 / (2d_y), \\ 1 > \sin \beta > d_3 / (2d_y), \end{cases} \quad (18)$$

适当地选择或者调整夹角  $\alpha$  和  $\beta$ , 使其满足(17) 式、(18) 式表达的关系,并适度调整编码器与二维物之间的距离,即可实现均匀波对隐失波的携带,取得对二维亚波长周期结构物的超分辨成像。

经编码后,合成信息为

$$f = f_x e_x + f_y e_y, \quad (19)$$

其中

$$\begin{cases} f_x = f_{1x} - (f_2 \cos \alpha + f_3 \cos \beta), \\ f_y = f_{1y} - (f_2 \sin \alpha + f_3 \sin \beta). \end{cases} \quad (20)$$

### 5.3 光路布置

物平面  $M_1$  放置了(13)式表达的编码器  $f_1$  后,将成像光路重新布置成图 4 所示的情形<sup>[1]</sup>。这里,为了将物信息放大到 CCD 相机所能辨识的像素大

小,在物面  $M_1$  和解码平面  $M_2$  之间放置了两个焦距不等的透镜  $F_1$  和  $F_2$ , 以使系统放大率达到  $M = f_{02}/f_{01}$ , 其中  $f_{01}$  和  $f_{02}$  分别表示透镜  $F_1$  和  $F_2$  的焦距,图中的 S1 和 S2 是两个对光束起滤波作用的二元振幅型方向滤波器,其取向分别沿着  $e_x$  和  $e_y$ , D 为解码光栅。

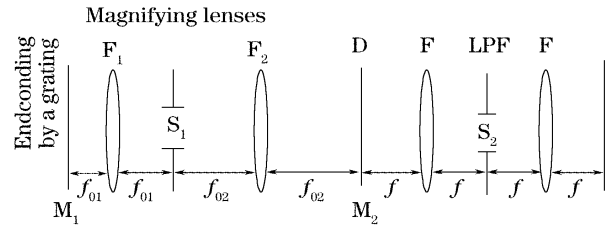


图 4 亚波长周期结构物成像的光学系统

Fig. 4 Optical system for the imaging of object with subwavelength periodic structure

### 5.4 成像过程分析

采用图 4 所示的成像光路,考虑到(20)式,经编码后,可将合成波的空间频率表为

$$f = f_x e_x + f_y e_y, \quad (21)$$

经方向滤波器 S1 的滤波作用,光子在  $(x, y)$  平面内的空间频率将变为

$$f_x = \sum_{i=1}^3 f_{ix}, \quad f_y = \sum_{i=1}^3 f_{iy}, \quad (22)$$

经  $F_1$  和  $F_2$  两透镜的作用,在  $M_2$  平面上,原空间信息  $d_i = 1/f_i (i = 1, 2, 3)$  均已经被放大了  $M = f_{02}/f_{01}$  倍。这时,若将均匀波中所含的编码信息取出,即可得到原周期物  $f_2 + f_3$  的相关信息。而取出高频信息较容易,因此图 3 应选取  $d_x < \max(d_1; d_2)$ 、 $d_y < \max(d_1; d_2)$  以使编码信息为高频,从而方便地在解码时取出。低通滤波器(LPF)正是为了滤去高频编码波信息而设。其孔径的选择应视编码光栅的周期  $d_x, d_y$  和系统放大率  $M$  的情况取定。在解码光栅  $M_2$  处得到的是经系统空间放大后的信息,经解码得到

$$f'_x = \left( \frac{1}{Md_x} - \frac{\cos \alpha}{Md_2} - \frac{\cos \beta}{Md_3} \right) \pm \frac{1}{Md_x}, \quad (23)$$

$$f'_y = \left( \frac{1}{Md_y} - \frac{\sin \alpha}{Md_2} - \frac{\sin \beta}{Md_3} \right) \pm \frac{1}{Md_y}, \quad (24)$$

的空间信息,因透镜截止频率的限制和后面低通滤波器的作用,高频被截止,最后得到

$$\begin{cases} f'_x = -\frac{\cos \alpha}{Md_2} - \frac{\cos \beta}{Md_3}, \\ f'_y = -\frac{\sin \alpha}{Md_2} - \frac{\sin \beta}{Md_3}, \end{cases} \quad (25)$$

即,

$$\begin{cases} f'_1 = -\frac{\cos \alpha}{Md_2} e_x - \frac{\sin \alpha}{Md_2} e_y, \\ f'_2 = -\frac{\cos \beta}{Md_3} e_x - \frac{\sin \beta}{Md_3} e_y, \end{cases} \quad (26)$$

与(14)式比较,这正是空间周期被放大了  $M$  倍的二维物空间信息。

另外,振幅型方向滤波器 S1 和 S2 开口方向平行于编码器,开口大小  $\Delta x_i$  和  $\Delta y_i$  由其放置的位置和衍射角度  $\varphi_x$ 、 $\varphi_y$  共同确定。对于滤波器 S1 和 S2,

$$2\lambda f_{01} [f_{1x} + f_2 |\cos \alpha| + f_3 \cos \beta] \geq \Delta x_1 \geq 2\lambda f_{01} [f_{1x} - f_2 |\cos \alpha| - f_3 \cos \beta], \quad (28)$$

$$2\lambda f_{01} [f_{1y} + f_2 |\sin \alpha| + f_3 \sin \beta] \geq \Delta y_1 \geq 2\lambda f_{01} [f_{1y} - f_2 |\sin \alpha| - f_3 \sin \beta], \quad (29)$$

式中  $f_{01}$  为透镜  $F_1$  的焦距,同理可取定滤波器 S2 的开度大小。

## 6 成像关键与设计极限

### 6.1 成像关键

基于以上分析,该成像过程的要素可从以下方面考虑。一是二维亚波长周期结构物的母本问题,在成像中,因为隐失波衰减太快,要求母本较薄,另外空间周期又处于亚波长段,这给母本制备造成了一定的困难;二是当不满足(17)式、(18)式给出的条件时,要通过旋转编码光栅来取得经编码形成均匀波的目的,但是,由于二维物同编码光栅靠得很近,同时还要保持编码光栅与两个方向滤波器同步旋转,这给实验操作带来一定的困难。解决上述问题,将是研究是否能取得突破的关键所在。

### 6.2 设计极限

二维成像的极限情况就是一维成像,由于一维亚波长周期结构母本的制备较为简单,适当放置编码器后又不需要同步旋转,因此,已取得了实验结果<sup>[1]</sup>,所采用的实验方法对二维成像提供了参考,其结果也为二维设计提供了初步证明。

#### 6.2.1 一维周期结构母本的制备

制备一维周期结构母本可采用传统的全反射干涉法。如图 5 所示,在玻璃基片上涂一感光薄层,当 He-Ne 激光器以大于等于全反射临界角入射时,例如和感光薄层上的  $y$  方向成  $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$  角入射的两列光,发生全反射<sup>[5,7]</sup>,全反射的两列光波在感光层上形成干涉条纹(为清楚起见,图中未画出倾角为  $\varphi_2$  的另一光线),经显影、定影后即可获得一维亚波长结构光栅<sup>[7]</sup>。

其入射光波空间频率的  $x, y$  分量可分别表为

$$\begin{cases} f_{xi} = \frac{\sin \varphi_x}{\lambda} = \frac{\Delta x_i}{2f_{0i}}, \\ f_{yi} = \frac{\sin \varphi_y}{\lambda} = \frac{\Delta y_i}{2f_{0i}}, \end{cases} \quad i = 1, 2 \quad (27)$$

例如,射入滤波器 S1 的空间频率的  $x$  和  $y$  分量分别为  $f_{x1}$  和  $f_{y1}$ ,由(20)式和(27)式可将其开度分别取定为

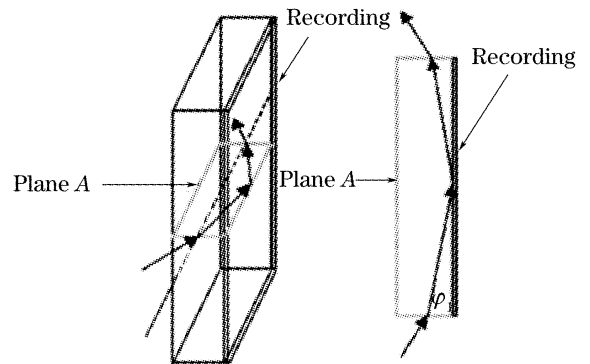


图 5 镀膜玻璃界面

Fig. 5 Photoresist glass interface

#### 6.2.2 二维极限

对于一维亚波长周期结构物  $f_2$ ,设计研究中涉及  $f_3$  的各项均不存在,选择编解码光栅沿着  $x$  轴方向,这时仅需用  $d_1$  取代(17)中的  $d_x$ ,用  $f_1$  取代(28)式中的  $f_{1x}$  即可得到相应的设计结果,采用图 4 的仪器布置,实验结果说明了设计的正确性<sup>[1]</sup>。

## 7 结 论

从以上研究可以发现,亚波长周期结构超分辨成像,实际上是基于叠栅技术实现的,在研究周期结构成像问题时,光子学方法是简洁方便的,尽管用传统方法实现一般亚波长结构的薄母本制作,工艺上稍显复杂,技术上存在一定困难,但原则上可实现一般二维亚波长周期结构的超分辨成像。一维亚波长周期结构的超分辨结果已经验证了设计的可行性,因此,对一般二维亚波长周期结构物,采用本文提出的设计方法将可对其进行超分辨成像。

### 参 考 文 献

- Zhang Chengyi, Tao Chuncan. Photonics study on imaging of one-dimensional periodic object with subwavelength structure[J].

- Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11): 1651~1656 (in Chinese)  
张成义,陶纯堪. 一维亚波长周期结构物成像的光子学研究[J].  
光学学报, 2006, **26**(11): 1651~1656
- 2 D. C. Bertilone. The contributions of homogeneous and evanescent plane waves to the scalar optical field; exact diffraction formulae[J]. *J. Mod. Opt.*, 1991, **38**(5): 865~875
- 3 Nikolai I. Petrov. Evanescent and propagating fields of a strongly focused beam[J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2003, **20**(12): 2385~2389
- 4 Zhang Chengyi, Tao Chunkan. A study of Talbot effect based on photonic theory[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(5): 63~66 (in Chinese)  
张成义,陶纯堪. 光栅 Talbot 效应的光子学研究[J]. 激光与光电子学进展, 2006, **43**(5): 63~66
- 5 Zhang Shulin. *Scanning Near-Field Optical Microscope & Its Application* [M]. Beijing: Science Press, 2003. 13~32 (in Chinese)  
张树霖. 近场光学显微镜及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2003. 13~32
- 6 Wang Shifan. *Theory and Practice on Information Optics* [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2004. 73~75 (in Chinese)  
王仕璠. 信息光学理论与应用[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004. 73~76
- 7 Vardit Eckhouse, Zeev Zalevsky, David Mendlovic. Subwavelength structure imaging[J]. *Opt. Eng.*, 2004, **43**(10): 2462~2468
- 8 Hou Changlun, Bai Jian, Hou Xiyun *et al.*. The accurate measurement of angle based on Talbot effect of Ronchi grating [J]. *Optical Instruments*, 2004, **26**(1): 11~14 (in Chinese)  
侯昌伦,白 剑,侯西云等. 基于 Ronchi 光栅 Talbot 效应的角度精确测量[J]. 光学仪器, 2004, **26**(1): 11~14
- 9 Gao Kan, Zhu Qing, C. Paul *et al.*. Experimental study of long period Moiré gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(7): 933~936 (in Chinese)  
高 侃,朱 清,C. Paul 等. 长周期莫尔光栅的实验研究[J]. 中国激光, 2006, **33**(7): 933~936
- 10 Gao Kan, Zhou Yingwu, Qu Ronghui *et al.*. Theoretical analysis of long-period Moiré gratings[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(3): 427~430 (in Chinese)  
高 侃,周赢武,瞿荣辉等. 长周期莫尔光栅的理论研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(3): 427~430
- 11 Zhang Chengyi, Tao Chunkan, Gao Wanrong. Recordation and reappearance for spatial information by photons [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(5): 57~61 (in Chinese)  
张成义,陶纯堪,高万荣. 光子对周期性空间信息的记忆与再现[J]. 光电工程, 2006, **33**(5): 57~61
- 12 Ding Jiansheng. Measurement of long focal length by using the Talbot effect and Moiré technique [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1994, **21**(1): 53~57 (in Chinese)  
丁建生. 应用 Talbot 效应和莫尔技术测量长焦距[J]. 光电工程, 1994, **21**(1): 53~57
- 13 Wenjian Cai, Timothy D. Gerke, Theodore J. Reber *et al.*. Computer-generated volume holograms optimize degrees of freedom in 3D aperiodic structures [J]. *Optics and Photonics News*, 2006, **17**(12): 26
- 14 Anthony J. Devaney, Pengyi Guo. Superresolution imaging from limited-aperture optical diffracted field data [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2005, **22**(6): 1086~1092
- 15 W. Lukosz. Optical systems with resolving powers exceeding the classical limit [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(11): 1463~1472
- 16 David Mendlovic, Adolf W. Lohmann, Naim Konforti *et al.*. One-dimensional superresolution optical system for temporally restricted objects [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(11): 2353~2359
- 17 M. A. Grimm, A. W. Lohmann. Superresolution image for one-dimensional object [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1966, **56**(9): 1151~1156
- 18 David Mendlovic, David Farkas, Zeev Zalevsky. High-frequency enhancement by an optical system for superresolution of temporally restricted objects [J]. *Opt. Lett.*, 1998, **23**(10): 801~803
- 19 Amir Shemer, David Mendlovic, Zeev Zalevsky *et al.*. Super-resolving optical system with time multiplexing and computer decoding [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(35): 7245~7251
- 20 Hu Hanhui, Liao Zhaoshu. A approach to the Moiré fringe with double frequency grating [J]. *J. Huazhong University of Sci. & Tech.* (Natural Science Edition), 2005, **33**(3): 72~74 (in Chinese)  
胡汉辉,廖兆曙. 倍频光栅的莫尔条纹研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2005, **33**(3): 72~74